

DOI: 10.5846/stxb202108292431

闫晓露, 李欣媛, 刘澄浩, 李佳伟, 钟敬秋. 生态系统服务簇空间演变轨迹及其社会-生态驱动的地理探测——以大连市为例. 生态学报, 2022, 42 (14): 5734-5747.

Yan X L, Li X Y, Liu C H, Li J W, Zhong J Q. Spatial evolution trajectory of ecosystem service bundles and its social-ecological driven by geographical exploration: A case study of Dalian. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42 (14): 5734-5747.

生态系统服务簇空间演变轨迹及其社会-生态驱动的地理探测

——以大连市为例

闫晓露^{1,2}, 李欣媛^{1,2}, 刘澄浩^{1,2}, 李佳伟³, 钟敬秋^{1,2,4,*}

1 教育部人文社科重点研究基地, 辽宁师范大学海洋经济与可持续发展研究中心, 大连 116029

2 辽宁省“海洋经济高质量发展”高校协同创新中心, 大连 116029

3 大连理工大学电子信息与电气工程学部, 大连 116029

4 中国科学院地理科学与资源研究所 资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101

摘要:生态系统服务簇是多种生态系统服务的组合,明晰生态系统服务簇及其自然-社会经济驱动因素,对生态系统服务内部相互依赖机制识别、实现多种生态系统服务间良性互动具有重要意义。目前生态系统服务簇的识别已得到广泛应用,但对多种生态系统服务之间交互作用的动态过程与影响机理的认识还不够深刻。针对目前多种生态系统服务间交互作用动态演化分析及其社会-生态驱动机理研究不足的现状,以我国北方沿海重要中心城市——大连市为例,选取食物供给、水源涵养、固碳释氧、土壤保持、生境质量和景观美学 6 种关键服务。采用 Spearman 相关性分析方法探究生态系统服务权衡与协同关系,借助自组织网络方法识别生态系统服务簇,进一步分析多种生态系统服务间交互作用的时空分异特征,运用地理探测器探究其空间分异影响因素。结果表明:①食物供给与土壤保持存在极显著的权衡关系($\bar{r}=-0.45$),土壤保持与景观美学存在极显著的协同关系($\bar{r}=0.50$)。②2005—2015 年大连市生态保育簇空间格局较稳定,水源涵养簇、食物供给簇与服务枯竭簇之间轨迹变化明显,城市扩张与服务枯竭簇演变具有一致性。③高程、归一化植被指数是影响生态系统服务簇空间分布的关键自然因素,而土地利用强度指数与地均 GDP 是影响其空间格局演化的主要社会经济因素。不同因子间交互作用会强化对生态系统服务簇空间分异特征的解释,特别是社会经济因子与自然因子间的交互作用对服务簇空间格局演化过程具有显著影响。开展基于服务簇的生态系统服务交互关系研究,可以为区域制定针对性保护规划提供科学依据。

关键词:生态系统服务簇; 权衡与协同; 地理探测器; 可持续管理

Spatial evolution trajectory of ecosystem service bundles and its social-ecological driven by geographical exploration: A case study of Dalian

YAN Xiaolu^{1,2}, LI Xinyuan^{1,2}, LIU Chenghao^{1,2}, LI Jiawei³, ZHONG Jingqiu^{1,2,4,*}

1 Center of Marine Economy and Sustainable Development of Liaoning Normal University, Key Research Base of Humanities and Social Sciences of the Ministry Education, Dalian 116029, China

2 University Collaborative Innovation Center of Marine Economy High-Quality Development of Liaoning Province, Dalian 116029, China

3 Faculty of Electronic Information and Electrical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116029, China

4 State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

基金项目:国家自然科学基金项目(42101113);教育部人文社会科学研究项目(21YJCZH193);辽宁省自然科学基金项目(2020-BS-183);大连市青年科技之星项目(2021RQ077)

收稿日期:2021-08-29; 网络出版日期:2022-03-23

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zjq@lnnu.edu.cn

Abstract: Ecosystem service bundles are a combination of multiple ecosystem services. Understanding the ecosystem service bundles and their ecological-social-economic driving factors is significant for identifying the internal interdependence mechanism of ecosystem services and realizing the benign interactions among multiple ecosystem services. Presently, identification of ecosystem service bundles has been extensively explored, but understanding of the dynamic process and influence mechanism of the interaction between multiple ecosystem services is not sufficiently comprehensive. Aiming at the current situation of insufficient research on the dynamic evolution analysis of interactions among various ecosystem services and their social-ecological driving mechanism, this study took the important coastal city of northern China—Dalian as an example, using six key services, including food supply, water conservation, carbon sequestration and oxygen production, soil conservation, habitat quality, and landscape aesthetics. Spearman rank correlation analysis was used to explore the trade-offs and synergies of ecosystem services. The self-organizing map methods were used to identify ecosystem service bundles. The temporal and spatial differentiation characteristics of the interactions of multiple ecosystem services were explored based on Geo-Detector to identify the influencing factors of its spatial differentiation. The results showed that: 1) there was a significant trade off relationship between food supply and soil conservation (the annual average correlation coefficient was -0.45); additionally, there was a strongly significant synergistic relationship between soil conservation and landscape aesthetics (the average annual correlation coefficient was 0.5). 2) the spatial pattern of ecological conservation bundle in Dalian from 2005 to 2015 was relatively stable, and the trajectories of water conservation bundle, food supply bundle, and service exhaustion bundle changed significantly, while urban expansion was consistent with the evolution of service exhaustion bundle. 3) Elevation and normalized vegetation index were the key natural factors that affected the spatial differentiation of ecosystem service bundles. Land use intensity index and GDP per land were the main socio-economic factors that affected the evolution of its spatial pattern. The interaction between different factors would strengthen the understanding of the spatial differentiation characteristics of ecosystem service bundles, and the interpretation of the spatial differentiation of ecosystem service bundles; particularly, the interaction between social-economic factors and ecological factors had a significant impact on the evolution of the spatial pattern of ecosystem service bundles. Further research on the interaction of ecosystem services based on ecosystem service bundles can provide a scientific basis for regional formulation of targeted land development and ecological protection planning.

Key Words: ecosystem service bundles; trade-offs and synergies; Geo-Detector; sustainable management

生态系统服务作为自然-人文系统耦合的桥梁,对维持人类福祉具有重要意义^[1]。然而,在快速城市化背景下,人类对自然资源无节制利用与破坏使全球超过 60% 的服务日趋退化,深刻影响“自然-社会经济”系统可持续发展^[2-3],党的十九大以来,生态文明顶层设计日益完善,生态系统修复与治理已取得阶段性成果,但如何促进经济发展与多种生态服务间良性互动,依然是可持续发展研究领域最为紧迫的问题之一^[4-6]。在既定景观中,多种生态系统服务时空共现形成生态系统服务簇^[7-8],簇中不同服务间此消彼长或同增同减的关联特征即为权衡或协同关系^[9-10],服务簇为表征多种生态系统服务复杂交互作用提供科学视角,探究其时空分异特征,对多种生态系统服务优化管理有重要意义^[11],也是将生态系统服务概念纳入生态系统管理决策和国土空间规划的关键步骤。

近年来,国内外学者从服务簇角度对生态系统服务间交互关系开展了大量研究,其中识别服务簇的方法主要有主成分分析^[12]、空间自相关分析^[13]、K-means 聚类分析^[14]与自组织网络分析^[15],如申嘉澍等^[16]运用自组织网络方法探究雄安新区多种服务间交互关系,发现四类服务簇的空间分布与土地覆被存在潜在联系;Chen 等^[17]通过主成分分析和 K-means 聚类分析方法识别由不同权衡与协同关系组成的 7 种服务簇,认为权衡关系主要发生在供给服务与其它服务之间。当前,关于服务簇的研究在内容与方法上日臻丰富,为本文深化研究提供基础,但仍存在以下不足:①以往研究只是简单分析多种生态系统服务之间的关系,局限在静态视

角下探讨服务簇的空间分布,由于自然资源禀赋和社会经济因素的差异,各类生态系统服务具有高度异质性与动态性,服务簇的空间格局也会随时间而变化^[18-19],综合探究其动态演变可以有效揭示生态系统服务簇空间格局与演化特征,对促进生态系统和社会经济的可持续发展有重要意义^[13]。②目前对服务簇的研究多聚焦于国家^[20]、地方^[21]、乡镇^[12]以及流域^[5]等较大尺度,虽然这种尺度便于区域管理,但对基于生态过程的服务而言,适宜的格网尺度更有利于实现土地精细化管理目标,而目前对格网等精细尺度下服务簇的研究较为缺乏^[22]。因此,为解决生态过程尺度与人类管理尺度不匹配问题,需要对格网尺度下生态系统服务簇的空间演化进行深入探讨,这对生态环境有效管理以及社会经济高质量发展具有重要意义^[23]。

近年来,多种生态系统服务交互关系的稳定性在自然过程和人类活动干扰下发生复杂变化^[24-25]。一些学者从驱动因素着手探讨多种生态系统服务间交互关系的形成机制,如 Lamarque 等^[26]对草地生态系统服务进行评估,研究发现气候和土地利用是影响其交互关系的主要因素;Feng 等^[27]探究了黄土高原地区生态系统服务之间的权衡程度,结果表明植被类型、坡度与土壤性质对于协调多种服务间权衡关系有重要意义。然而,从现有研究来看,多数学者主要探讨自然环境因素对多种生态系统服务交互关系的影响,而忽略了人文因素^[28-29]。社会经济因素既是城市发展的引擎,又是环境问题的中心。Bennett 等^[11]提出多种生态系统服务交互关系存在共同驱动和相互影响两种方式,探究社会经济和自然因子对服务簇的复合影响是理解多种生态系统服务间是否发生冲突的关键^[24]。因此,系统探究服务簇与自然-社会经济系统之间的关系可以确保生态系统的有效管理。

党的十九大报告强调,山水林田湖草是生命共同体,要统筹考虑各生态要素,以保护和系统修复为主线,从而达到维护生态平衡的目标。沿海地区在我国社会经济发展过程中具有重要战略意义,改革开放以来,在国家与地方层面共同推动下,沿海开放城市经济迅速崛起。伴随着人类对海洋与陆地资源开发的日益深入,沿海城市在发展过程中引发的环境问题逐渐引起人们的重视。大连是中国最早对外开放的沿海城市之一,海陆兼备的区位优势以及雄厚的工业基础,在带来巨大经济效益同时,也使区域生态环境发生显著退化,如土壤侵蚀加剧、生物栖息地破碎化、大气污染与河道淤积等问题接踵而至,陆海协同保护亟待加强。基于此,本研究根据大连市突出生态问题,定量测度 2005—2015 年区域食物供给、土壤保持、生境质量、固碳释氧、水源涵养与景观美学 6 种关键服务的时空变化特征;运用相关性分析方法定性判别各服务之间权衡与协同关系;基于自组织网络方法识别生态系统服务簇,探究多种生态系统服务交互作用的时空特征;应用地理探测器分析其空间分异的驱动因素。研究结果有助于大连市政府有的放矢制定生态保护对策,为沿海城市因地制宜实施生态修复措施提供科学参考。

1 研究区与数据来源

1.1 研究区概况

大连市位于 120°98′—123°52′ E, 38°73′—40°22′ N 之间,地处辽东半岛南端(图 1),地势由中轴向东西两侧黄、渤海倾斜,山地和丘陵地貌广泛分布。全市下辖 7 个区(市内 4 区、旅顺口区、金州区、普兰店区)、1 个县(长海县)、代管 2 个县级市(庄河市、瓦房店市),辖区总面积 12574 km²,以旱地、林地和建设用地为主。大连优质港湾众多,海洋产业及造船业国内保持领先,是东北亚重要的国际航运中心,也是辽宁省海洋经济高质量发展的重要增长极。伴随着大连市建设步伐加快,大面积的生态用地被不断分割,原有生物地球化学循环过程随土地覆被变化而消失,直接威胁到区域生态系统服务功能正常运行。因此,亟需明晰大连市生态系统服务簇时空演变特征及其驱动因素,厘清多种生态服务间冲突关系,从而推动社会经济高质量发展与生态环境保护共赢。

1.2 数据来源

本文所使用的基础数据如下:

①土地利用数据:根据对 GF-2 遥感影像解译,对植被覆盖类型进行了分类,经检验 Kappa 指数为 0.81,结

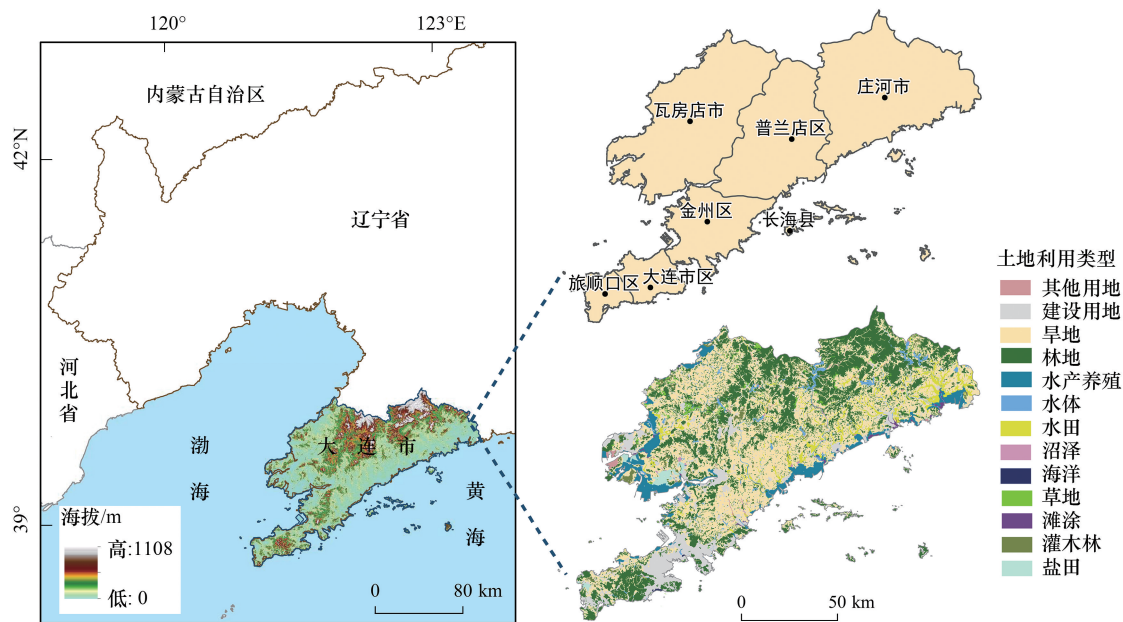


图 1 研究区位置图

Fig.1 Location of the study area

果可靠,空间分辨率 30 m。②MODIS 数据:来源于(<https://www.nasa.gov/>) MODIS13Q1 数据集,空间分辨率 250 m,经 ArcGIS 重采样为 30 m。③地形数据:来源于(<http://reverb.echo.nasa.gov/>),空间分辨率 30 m。④土壤数据:来源于(<http://westdc.westgis.ac.cn/>),经 ArcGIS 重采样为 30 m。⑤气象数据:来源于(<http://data.cma.cn/>),包括降雨、气温、辐射、平均温度与风速等气象数据。⑥社会统计数据:来源于大连市统计年鉴与中国海洋统计年鉴等。以上所有数据均基于 ArcGIS 软件统一为投影坐标系 WGS_1984_UTM_Zone_51N。

1.3 影响因子数据

综合考虑大连地域环境及数据非共线性,建立影响服务簇空间分异的指标体系(表 1)。

表 1 大连市生态系统服务簇影响因子

Table 1 The influencing factors of ecosystem service bundles in Dalian

指标类型 Indicator types	驱动因子 Driving factors	指标类型 Indicator types	驱动因子 Driving factors
自然因素 Natural factors	归一化植被指数	社会经济因素 Socio-economic factors	土地利用强度指数
	坡度		地均 GDP
	年平均温度		城市化率
	年太阳辐射		人口密度
	年均降水		
	高程		

2 研究方法

2.1 生态系统服务评估

基于模型及软件测算 2005—2015 年 6 种生态系统服务(表 2),并对测算结果进行验证。

2.2 权衡与协同关系分析

首先对 6 种生态系统服务进行极差正规化处理,然后基于 ArcGIS 软件进行样点采集,最后运用 R 语言的 corrpilot 包,应用 Spearman 相关分析方法判别 6 种生态系统服务之间的相关关系并实现可视化。

$$r = \frac{\sum i(x_{ij} - \bar{x})(y_{ij} - \bar{y})}{\sqrt{\sum i(x_{ij} - \bar{x})^2 \sum i(y_{ij} - \bar{y})^2}}$$

(1)

式中, r 为相关系数, 值域 $[-1, 1]$, 若 $r > 0$, 表示两个服务之间存在协同关系; $r < 0$, 意味着两个服务之间存在权衡关系。 x_{ij} 和 y_{ij} 表示不同类型生态系统服务数据值。

表 2 生态系统服务评估方法及计算公式

Table 2 The evaluation method and equation of ecosystem services		
生态系统服务 Ecosystem services	评估方法 Evaluation method	计算公式 Equation
食物供给 Food supply	采用收获率方法; 经济作物赋予旱地、水稻赋予水田、畜牧产品赋予草地、坚果赋予林地、淡水产品赋予水产养殖、远洋捕捞赋予海洋	$V = \sum \frac{Y_i}{P_i}$ V 为食物供给单位面积产量 (t/hm^2); Y_i 为第 i 类别食物总产量 (t/hm^2); P_i 为第 i 类别食物所占面积 (hm^2)
水源涵养 Water conservation	采用水量平衡方法基于 InVEST 模型估算大连年产水量, 综合考虑流速、土壤渗透性等因素, 计算大连市水源涵养量	$WR = \min(1, 249/\text{Velocity}) \times \min(1, 0.3TI) \times \min(1, K_{\text{sat}}/300) \times Y_x$ $Y_x = (1 - \text{AET}_x/P_x)$ WR 为水源涵养量 (mm); Velocity 为流速系数; TI 为地形指数; K_{sat} 为土壤饱和导水率 (mm/d); Y_x 为年产水量 (mm); AET_x 为栅格单元 x 的年均实际蒸散量 (mm); P_x 为栅格单元 x 的年均降雨量 (mm)
固碳释氧 Carbon sequestration and oxygen production	以净初级生产力 (Net primary productivity, NPP) 为基础, 采用 CASA 模型进行估算	$CS = 1.63 \times \text{NPP}_x + 1.2 \times \text{NPP}_x$ CS 为固碳释氧量 ($\text{g C}/\text{m}^2$); NPP_x 为栅格单元 x 的 NPP 值 ($\text{g C}/\text{m}^2$)
土壤保持 Soil conservation	基于 RUSLE 模型计算土壤保持量	$SC = R \times K \times LS \times (1 - C \times P)$ SC 表示土壤保持量 (t/hm^2); R 表示降雨侵蚀性因子; K 表示土壤可侵蚀性因子; LS 表示坡长坡度因子; C 表示植被覆盖和作物管理因子; P 表示水土保持措施因子
生境质量 Habitat quality	基于 InVEST 模型计算生境质量指数	$Q_{xj} = H_j \left[1 - \left(\frac{D_{xj}^z}{D_{xj}^z + k^z} \right) \right]$ Q_{xj} 为景观类别 j 中像元 x 的生境质量; D_{xj} 为景观类别 j 中栅格 x 所受胁迫水平; k 为半饱和常数; z 为归一化常量; H_j 为景观类别 j 的生境适宜性
景观美学 Landscape aesthetics	采用当量因子法计算景观美学服务	$V = \sum \frac{1}{7} \times L_i \times \frac{S_i}{S} \times Q \times P_f \times \mu$ V 为景观美学价值 ($\text{元}/\text{hm}^2$); L_i 为大连市第 i 景观类别单位面积价值当量因子^[30-31]; S_i 为第 i 景观类别面积 (hm^2); S 为大连市面积 (hm^2); Q 为年均粮食单产 (kg/hm^2); P_f 为 2015 年大连粮食的市场均价 ($\text{元}/\text{kg}$); μ 为大连市平均旅游收入与全国平均旅游收入比值

2.3 自组织映射网络

Kohonen 提出自组织映射网络 (Self-Organizing Map, SOM)^[32], 不同于传统数理方法, SOM 方法结合了主成分分析和 K-means 聚类分析方法, 通过近邻关系函数保留输入空间的拓扑结构并在分析中添加空间信息, 运用竞争学习策略, 依靠神经元之间互相竞争, 逐步优化网络, 实现分类处理。本研究利用 SOM 方法识别生态系统服务簇, 首先综合考虑研究区可塑性单元大小和生态空间特性两方面, 多次对比遴选 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 网格单元为最优尺度, 以便更精确的揭示多种生态系统服务空间交互作用。其次, 对 6 种生态系统服务数据进行无量纲处理。然后, 根据 R 语言中 clusGap 函数来确定最优聚类数。最后基于 Matlab R2019b 平台 selforgmap 函数对 6 种生态系统服务数据进行训练, 经过 2000 次训练后, 聚类结果实现稳定。

2.4 地理探测器

地理探测器由王劲峰等提出^[33], 通过探究自变量对因变量的解释程度, 揭示因变量空间分布特征背后驱动力。鉴于地理探测器在研究空间异质性和分类变量方面具有显著优势, 故选择此方法识别生态系统服务簇空间分异主导驱动力, 计算公式如下:

$$q = 1 - \frac{1}{N\sigma^2} \sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2 \tag{2}$$

式中, q 表示影响因素解释率,取值范围为 0 到 1, q 值越大则解释率越强; X 和 Y 变量叠加在 Y 方向形成 L 层,用 $h=1, 2\cdots, L$ 表示; N_h 和 N 分别为子区域 h 和全区的样本数; σ_h^2 和 σ^2 分别是子区域 h 和全区域 Y 的离散方差。

地理探测器还可以探究两个自变量因子共同作用时对因变量的解释程度,如表 3 所示。

表 3 交互作用类型
Table 3 Types of interaction

交互作用类型 Interaction types	判断准则 Judgment Criteria
非线性减弱 Weaken, nonlinear	$q(X_1 \cap X_2) < \text{Min}(q(X_1), q(X_2))$
单因子非线性减弱 Weaken, univariate	$\text{Min}(q(X_1), q(X_2)) < q(X_1 \cap X_2) < \text{Max}(q(X_1), q(X_2))$
双因子交互增强 Enhance, bivariate	$q(X_1 \cap X_2) > \text{Max}(q(X_1), q(X_2))$
非线性增强 Enhance, nonlinear	$q(X_1 \cap X_2) > q(X_1) + q(X_2)$
相互独立 Independent	$q(X_1 \cap X_2) = q(X_1) + q(X_2)$

X_1 和 X_2 代表服务簇的影响因子,符号“ $\cap$ ”表示 X_1 和 X_2 之间的交互作用

3 结果与分析

3.1 生态系统服务时空动态分析

本文定量评估 2005—2015 年大连市 6 种生态系统服务(图 2)。结果显示,2005—2015 年食物供给与固碳释氧量年均值呈增加趋势,其中食物供给量增幅为 2.70%,随着人们需求量增加、远洋捕捞技术与规模化养殖水平的提高,食物供给服务在空间上呈现东西高南北低的空间格局;固碳释氧量增幅为 17.09%,由于气温与降水等自然因素变化,导致 2015 年归一化植被指数较高,故 2015 年固碳释氧量整体增加。另外,受人类活动干扰影响,土壤保持、生境质量、景观美学及水源涵养服务年均值发生不同程度减少,其中水源涵养服务退化最为严重,减少 41.59%。与食物供给服务不同,所有支持、调节与文化服务空间分布格局具有一定相似性,高值均集中分布在植被郁闭度较高、保水率较好、景观较完整的山地林区,而低值主要分布在人类活动频繁的

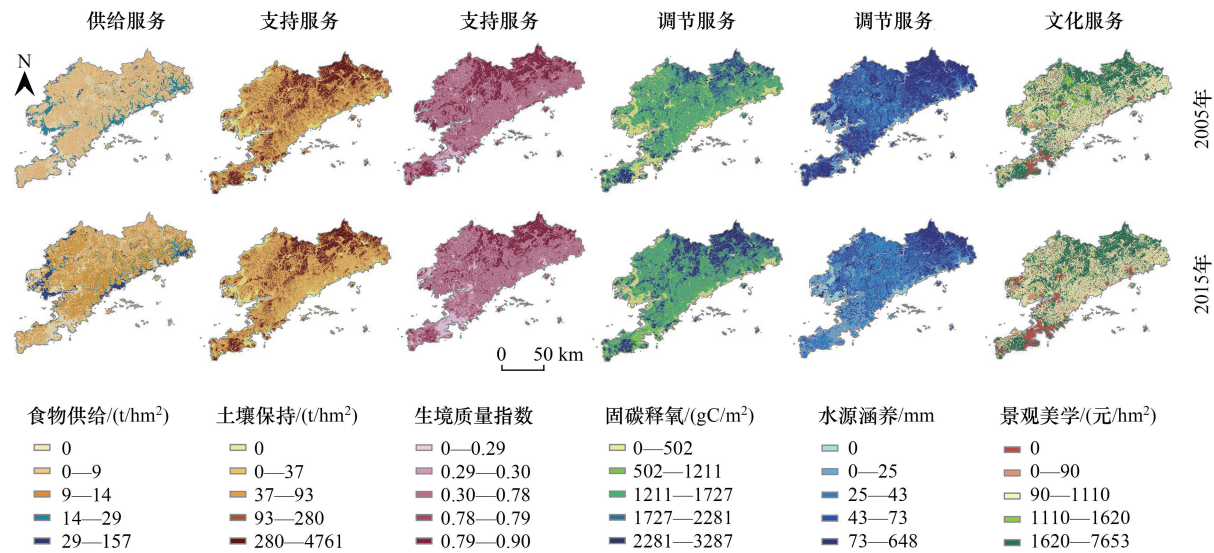


图 2 2005—2015 年大连市生态系统服务空间分布
Fig.2 Spatial distribution of ecosystem services in Dalian, 2005 and 2015

城建区与东西部地势较为平缓的农垦区。

3.2 生态系统服务相互作用及动态演变分析

3.2.1 生态系统服务相关性分析

根据图 3 所示,浅色系表示正相关,深色系表示负相关,椭圆形状越扁则绝对值越大。2005—2015 年所有相关系数均通过 0.001 显著性检验,权衡关系存在于食物供给服务与其余 5 种服务之间,其中食物供给与土壤保持权衡关系最强,年均相关系数达-0.45,农田与水产养殖区域食物供给能力较高,但这些区域土壤保持、生境质量、景观美学、水源涵养和固碳释氧供给能力均低,故呈现此消彼长的权衡关系。除食物供给服务外其他各服务之间均表现出显著的协同关系,其中土壤保持与景观美学间年均相关系数约为 0.50,协同关系最强,由于植被覆盖率高的区域生物多样性丰富,景观格局完整,固碳能力较高。所以调节、支持与文化服务之间均呈相互增益的协同关系。总体来看,食物供给与支持、调节、文化服务往往存在冲突现象,粮食生产与水产养殖是当地农渔民的主要经济收入来源,但农田与水产养殖用地增加会不断压缩生态用地空间,进而影响区域生态系统安全。在未来决策规划中应划定农牧渔区固定边界,保护优质粮食生产区域同时加大对低产农田的技术开发,避免对生态用地的侵占。

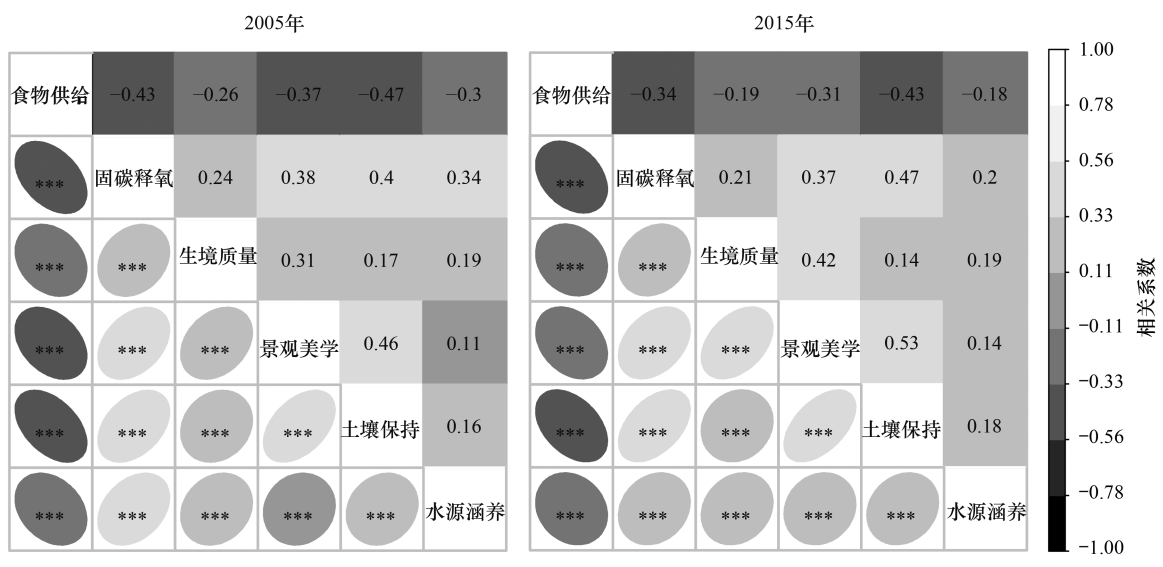


图 3 2005—2015 年大连市不同生态系统服务间的相关性关系

Fig.3 Spearman correlations between pairs of ecosystem services in Dalian, 2005 and 2015

*** 表示在 0.001 水平上显著相关、** 表示在 0.01 水平上显著相关、* 表示在 0.05 水平上显著相关

3.2.2 生态系统服务簇及其动态演变

运用自组织网络方法识别出大连市 4 种生态系统服务簇(图 4),基于分类结果进一步探究 2005—2015 年生态系统服务簇轨迹变化(图 5)。根据各服务簇内部供给特征,分别命名为生态保育簇、水源涵养簇、服务枯竭簇与食物供给簇。生态保育簇,该类服务簇集中分布在研究区北部庄河市、普兰店市林区及南部旅顺口区森林公园,空间位置未发生明显变化。簇中除食物供给服务能力较低外,其余 5 种服务供给能力较为均衡,由于所处位置海拔较高、人为干扰较少、森林覆盖率较高,故该区生态环境质量较好,存在广泛协同关系。水源涵养簇,该簇在所有服务簇类型中占比最少,集中分布在降水量较丰富的东部庄河市、西部瓦房店市与南部旅顺口区,簇中水源涵养服务远高于其他服务。受自然环境与人为活动干扰的共同影响,2015 年水源涵养功能严重退化,南部与西部水源涵养簇也发生明显变化,轨迹大多转至服务枯竭簇,而这些区域主要位于大连市经济发展的核心区,表明城市扩张是引起水源涵养簇变化的主要原因。服务枯竭簇,该类服务簇在所有服务簇类型中占比最多,集中分布在研究区各区县中心城区,这些区域人类活动频繁,簇中各项服务供给能力均

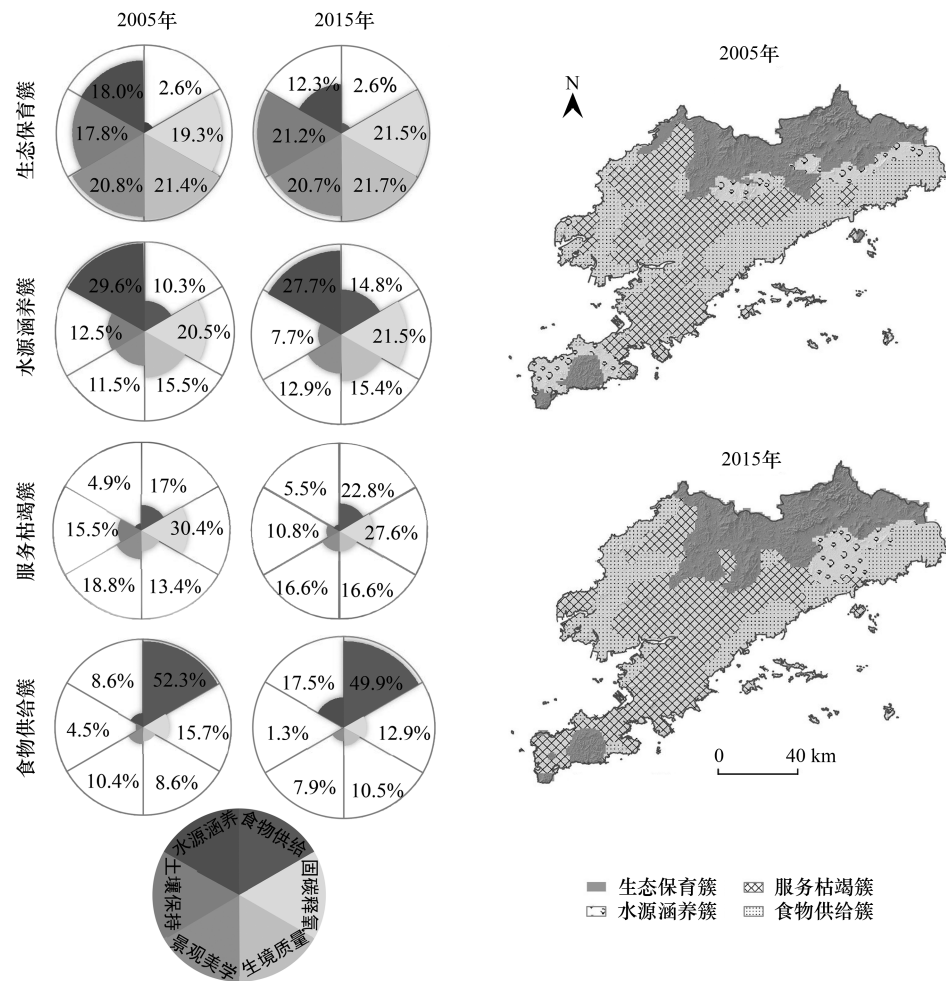


图 4 2005—2015 年大连市生态系统服务簇空间分布及模式

Fig.4 Spatial distribution and patterns of ecosystem service bundles in Dalian, 2005 and 2015

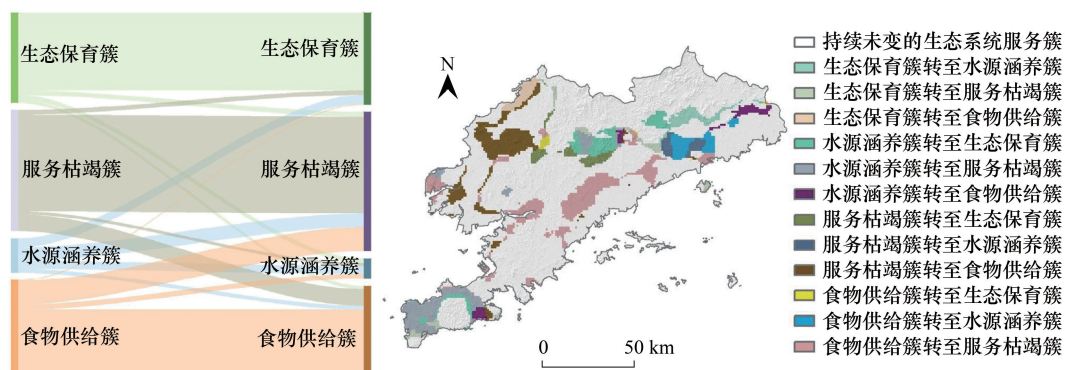


图 5 2005—2015 年大连市生态系统服务簇演变轨迹

Fig.5 Movement trajectory of ecosystem service bundles in Dalian, 2005 and 2015

低,生态环境质量较差,且在研究区所占比例持续扩大。食物供给簇,该类服务簇集中分布在研究区东部庄河市与西部瓦房店市海拔较低的平原地带,由于降水充足、灌溉条件优越,该簇中食物供给能力较为突出,其余五项服务与之均存在较大差异,受土地覆被变化影响,瓦房店市西部长兴岛港区、中部金州区普湾港区与皮口

港区的主导生态系统服务簇由初始的食物供给簇转至服务枯竭簇。

3.2.3 基于地理探测器的自然-社会经济驱动因素识别

影响生态系统服务簇空间分异的驱动因子及解释力如表 4,可以发现不同阶段各因子变量对生态系统服务簇空间分异的影响具有显著差异。自然因素中高程与归一化植被指数对区域生态系统服务簇空间分异的解释力突出,2005—2015 年高程对生态系统服务簇空间分布解释力分别为 0.413 和 0.467,归一化植被指数解释力分别为 0.251 和 0.307,解释程度均呈增强态势。社会经济因素中,2005 年和 2015 年土地利用强度指数解释力分别为 0.255 和 0.233,地均 GDP 的解释力分别为 0.108 和 0.175,并在所有影响因子中增幅最大。总体来看,自然因素对生态系统服务簇空间分布及演化具有决定性影响,但社会经济发展对生态系统的影响程度在逐渐增大,不容忽视。

表 4 大连市生态系统服务簇影响因子探测结果
Table 4 Detection results of impact factors of ecosystem service bundles in Dalian

因子 Factors	年份 Years		因子 Factors	年份 Years	
	2005	2015		2005	2015
归一化植被指数 Normalized difference vegetation index	0.251 ***	0.307 ***	高程 Elevation	0.413 ***	0.467 ***
坡度 Slope	0.178 ***	0.201 ***	土地利用强度指数 Land use intensity	0.255 ***	0.233 ***
年平均温度 Average annual temperature	0.144 ***	0.189 ***	地均 GDP GDP per unit area	0.108 ***	0.175 ***
年太阳辐射 Annual solar radiation	0.201 ***	0.174 ***	城市化率 Urbanization rate	0.131 ***	0.032 ***
年均降水 Average annual precipitation	0.095 ***	0.136 ***	人口密度 Population density	0.111 ***	0.100 ***

*** 表示在 0.001 水平上显著相关、** 表示在 0.01 水平上显著相关、* 表示在 0.05 水平上显著相关

交互作用探测结果显示如图 6,2005—2015 年 45 对交互组合中均不存在相互减弱情况,交互作用以双因子增强类型为主,说明双因子交互作用会强化对生态系统服务簇空间分异特征的解释。2005 年对服务簇空间分布解释力最高的五组为:年均降水∩年太阳辐射(0.565)>高程∩年太阳辐射(0.564)>高程∩年平均温度(0.558)>高程∩年均降水(0.505)>高程∩城市化率(0.466)。2015 年对服务簇空间分布解释力最高的五组为:高程∩年平均温度(0.611)>高程∩年均降水(0.588)>高程∩地均 GDP(0.568)>高程∩年太阳辐射(0.555)>高程∩土地利用强度指数(0.499)。在五种交互组合中,高程与地均 GDP 交互作用增速最快,表明社会经济因子与自然因子间的交互作用对服务簇空间格局的演化过程具有显著影响且势头强劲。综上,高程、温度以及降水等自然因素是生态系统服务形成的必要条件,故自然因子间交互作用是影响生态系统服务簇空间分布的关键因素。但是,自然因子与社会经济因子间的交互作用始终强烈影响区域服务簇的分布与演化。

4 讨论与结论

4.1 讨论

4.1.1 模型模拟结果验证

由于生态系统服务评估结果的可靠性对于后续研究有直接影响,故本文选取水源涵养、固碳释氧、土壤保持与生境质量 4 种模型模拟结果进行验证。①水源涵养方面,本研究水源涵养量是基于 InVEST 模型模拟的产水量进行计算,故对产水量结果进行验证。根据《2005—2015 年辽宁省水资源公报》^[34—35],大连市实际水资源总量平均值为 $25.45 \times 10^8 \text{ m}^3$,与本文模型模拟的产水量 $23.6 \times 10^8 \text{ m}^3$ 比较的相对误差控制在 7.26%,其他学者基于此方法进行验证也显示出类似的情况^[36],表明大连市产水总量得到较好模拟,研究结果可行。②固碳释氧方面,本研究运用回归分析与相关性分析方法,选择 MODIS17A3 数据对模型模拟的 NPP 进行验证。如图 7 所示,2005 年和 2015 年回归系数分别为 0.664 和 0.726,Spearman 相关系数分别为 0.733 和 0.727,NPP 和 NPP* 之间存在显著相关性,说明模拟结果与实际数据的拟合程度较好,CASA 模型在研究区具有良好适用性。③土壤保持方面,《大连市水土保持规划(2016—2030 年)》指出截止 2015 年底^[37],大连市平均土壤侵

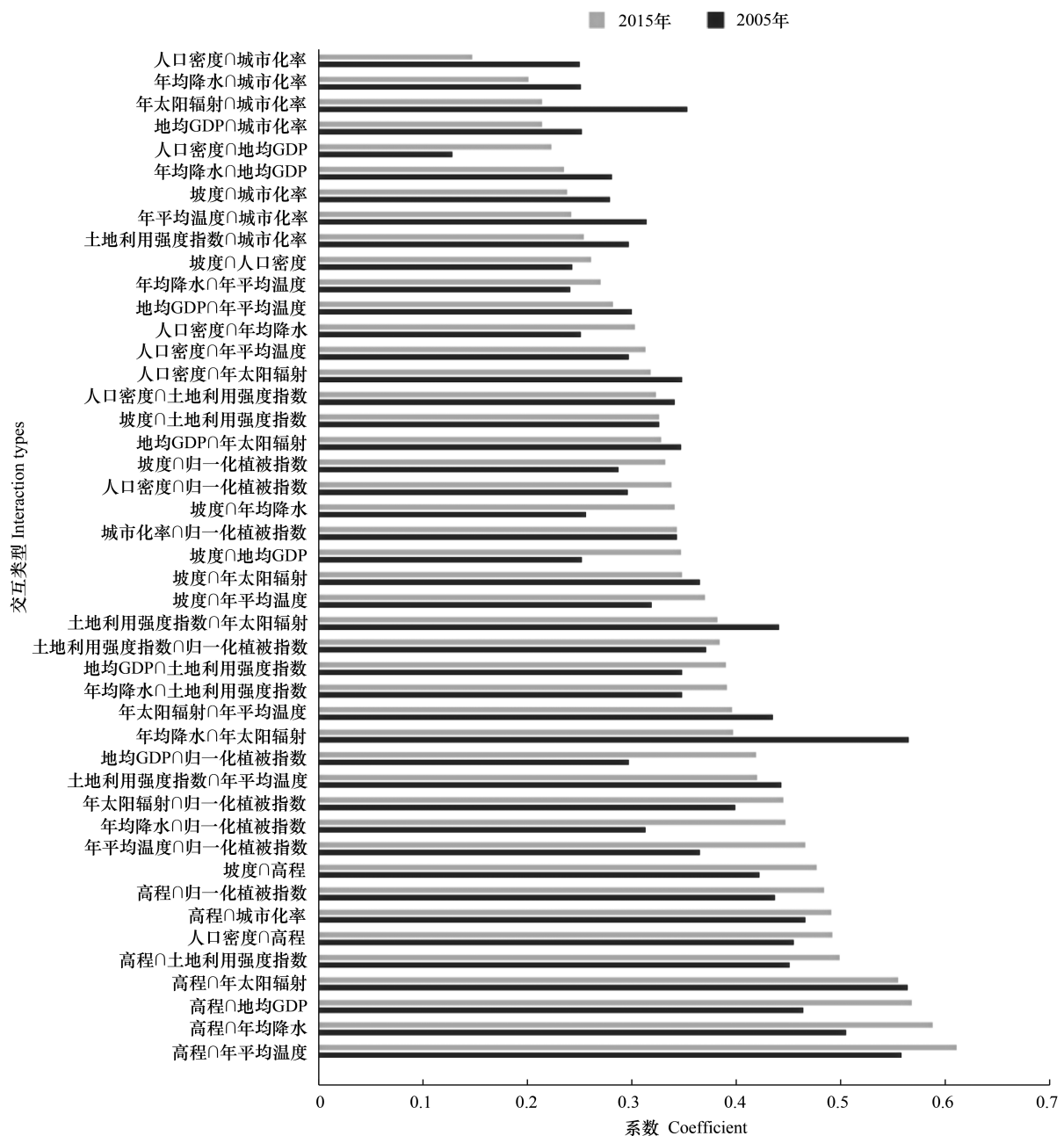


图6 大连市服务簇空间分布影响因子交互作用

Fig.6 Interaction of influencing factors on spatial distribution of ecosystem service bundles in Dalian

蚀量为 23.60 t/hm^2 , 与本研究基于模型模拟得到的土壤侵蚀量 26.49 t/hm^2 进行对比, 相对误差为 12.24%, 说明 RUSLE 模型应用于大连市土壤保持模拟可行。④生境质量方面, 根据杨志鹏等^[38] 基于 InVEST 模型模拟 2005—2015 年东北地区生境质量分布情况, 研究显示大连市北部和南部生境质量指数为 0.8—1.0, 大连中部为 0—0.2, 与本研究基于该模型模拟得到的生境质量指数空间分布较为一致, 说明模拟结果良好。综上, 虽然 CASA 模型、RUSLE 模型与 InVEST 模型为区域生态系统服务测度提供了可行方法, 但由于模型方法的简化以及缺乏大量观测数据, 使研究结果的不确定性增加^[39]。因此, 未来研究应加强野外实验数据的观测及采样, 对模型进行参数修正, 提高评估结果的可信度和可靠性。

4.1.2 基于生态系统服务簇的土地利用格局优化

在不同阶段, 土地利用强度指数对大连市生态系统服务簇空间格局演化均产生强烈影响, 综合探究大连

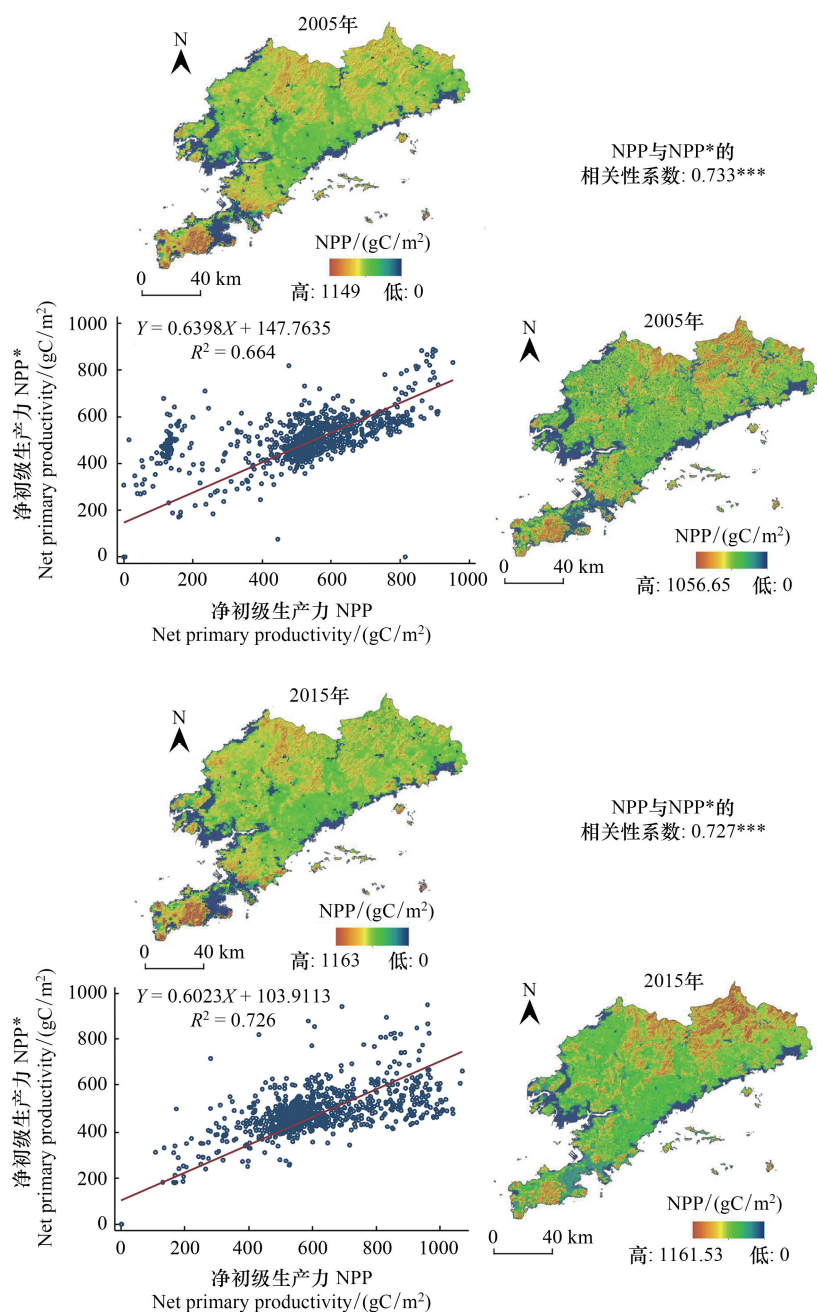


图7 NPP与NPP*对比

Fig.7 Comparison of NPP and NPP*

NPP*: MODIS17A3数据, NPP: CASA模型模拟结果; ***表示在0.001水平上显著相关

市生态系统服务簇演变轨迹与土地利用变化的潜在联系,可以为区域可持续发展提供科学参考。2005—2015年大连市土地利用类型变化显著(图8),其中建设用地面积增加最为强烈,其次为水产养殖,而林地、农田、草地与沿海面积明显减少。城建区的快速扩张使该区域生态系统服务簇空间格局发生明显转变,特别是在南部旅顺口区新城、西部瓦房店市长兴岛临港工业区、东部庄河市花园口工业园区、东南部普兰店市皮杨中心产业区以及中部金普新区尤为明显。土地利用类型交互转换轨迹显示,大量旱地、林地、海洋与草地面积输出转至建设用地,城市扩张导致植被退化,使得南部旅顺口区主导服务簇类型由初始的水源涵养簇转为服务枯竭簇,中部金州区沿港主导服务簇类型也由食物供给簇转为服务枯竭簇。由此说明城市扩张与服务枯竭簇演变具

有一致性,这与冯兆等^[13]的研究结果较为一致。此外,本研究发现社会经济因子与自然因子间的交互驱动对服务簇的演化过程具有重要影响。因此,同时采取生态保护措施和控制人类活动强度可以保证多种生态系统服务的持续供给。

社会经济-生态系统的耦合协调对于区域高质量发展具有重要作用,从生态系统服务簇演化轨迹来看,多种生态系统服务间权衡与协同关系发生变化的根本原因是人类通过改变土地利用等方式有选择地使用自然生态系统服务的结果^[15],在生态保育簇与食物供给簇中供给服务与调节服务、支持服务以及文化服务之间始终存在着此消彼长的空间权衡关系,此前对生态系统服务权衡关系的分析也显示了同样的结果,这与前人的研究结果相一致^[12,16],根据不同服务簇的结构特征因地制宜实施生态保护与修复措施可以为区域发展与生态建设提供决策支持。鉴于此,本研究提供如下建议:①

南北部生态保育簇:包括瓦房店市、普兰店市、庄河市北部林区以及南部旅顺口区老铁山林区,区域内自然保护区、森林公园和水库广泛分布,是文化、调节和支持服务的主要供给地。未来可优化生态保护红线范围,重点保护,禁止开发,充分发挥区域生态安全屏障作用。利用区域内天然山野资源发展有机食品加工,开发生态旅游,形成生态本底向好与经济基础不断提升的新格局。②东北部水源涵养簇:包括庄河市东北部与长海县南部,区域内降水充裕,是重要的水源供给地。未来应加强对庄河市域内碧流河、英纳河等河流水源保护,禁止一切破坏生态平衡以及可能造成水源污染的活动,统筹兼顾农业、工业和服务业用水,合理控制地下水开采,广泛种植水源涵养林和水土保持林。③中南部服务枯竭簇:区内植被覆盖率低,人类活动频繁。未来应坚持“以生态保护为主、城镇发展为辅”的原则。划定生态源地及生态-经济廊道,包括城市周边结构性绿地、水体及少量农田等,实现城市内外蓝绿空间连通,做到区域开发边界与生态保护红线不交叉不冲突。同时,实施国土空间生态修复措施,增加城市绿化带,扩大绿色空间占比,提高区域生态功能与服务能力。④东西部食物供给簇:包括研究区西部瓦房店市和庄河市东部平原地带,区域内地势平坦,水土条件优良,农牧渔业发达,土地利用类型以农田与水产养殖用地为主。未来应重视生态环境保护,推广生态农业,减少化肥使用量,增用有机粪肥,提高土壤有机质含量。切实保护基本农田,严格执行土地利用法规,禁止乱占耕地,控制耕地面积减少趋势。注重食物产出品质,提高渔牧业规模化养殖水平、加强田间管理,进而提升生态系统服务供给能力。基本农田保护区内耕地可加强农田整治工程、防护林建设工程等环境建设,并充分发挥耕地的生态功能,改善区域内生态环境。

4.2 结论

本文对大连市 2005—2015 年两期 6 种服务功能进行量化,在深入了解多种服务间交互关系时空分异特征基础上,进一步探究其主导驱动因素,主要结论如下:

(1) 2005—2015 年间除食物供给与固碳释氧服务呈增加趋势外,其它服务均表现出退化趋势;调节、支持与文化服务高值区主要分布在研究区西南-东北沿线山区,各项服务之间表现出显著协同关系。食物供给服务表现出相反空间格局,呈现“东西平原高,西南-东北山地低”的分布态势,与调节、支持、文化服务之间均表现出显著权衡关系。

(2) 大连市 6 种生态系统服务在空间上共现形成供给特征迥异的四种服务簇,分别为南北部生态保育簇、东北部水源涵养簇、中南部服务枯竭簇与东西部食物供给簇。2005—2015 年大连市生态保育簇空间格局

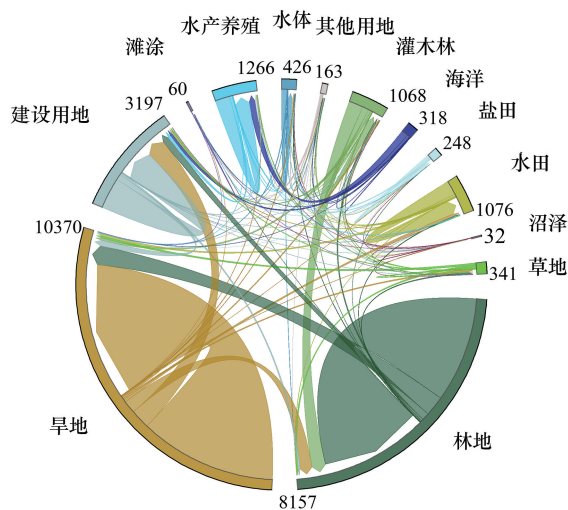


图 8 2005—2015 年大连市土地利用类型变化

Fig.8 Changes of land use types in Dalian, 2005 and 2015

较稳定,演变轨迹主要发生在水源涵养簇、食物供给簇与服务枯竭簇之间,服务枯竭簇演变轨迹与城市扩张较一致。

(3) 高程及归一化植被指数是影响生态系统服务簇的关键自然因素,土地利用强度指数与地均 GDP 是影响生态系统服务簇空间分异的主要社会经济因素。交互探测显示,大连市服务簇空间分异现象由多因子共同作用。自然因子间交互作用与生态系统服务簇空间分布存在高度关联性,但限于经济发展及政府决策支持,社会经济因子与自然因子间的交互作用对服务簇空间格局演化具有显著影响且增幅强劲。

总体而言,探究大连市生态系统服务簇时空分异特征及其驱动力,有助于理解多种生态系统之间内在联系。分析生态系统服务簇在不同阶段的演变轨迹,对明确区域生态退化方向、指导生态文明建设具有重要意义。以此为基础,采取相应措施对生态脆弱区进行修复,可以最大程度提升生态系统服务供给质量,从而引导生态保护与区域经济耦合互馈、动态良性发展。研究结果不仅为大连市生态保护政策制定提供科学依据,而且对我国沿海地区生态退化方向识别、指导生态恢复和建设也具有重要参考价值。

参考文献 (References):

- [1] Peng J, Wang X Y, Liu Y X, Zhao Y, Xu Z H, Zhao M Y, Qiu S J, Wu J S. Urbanization impact on the supply-demand budget of ecosystem services: decoupling analysis. *Ecosystem Services*, 2020, 44: 101139.
- [2] Millennium Ecosystem Assessment. *Ecosystems and Human Well-being*. Washington, DC: Island Press, 2005.
- [3] 方露露, 许德华, 王伦澈, 牛自耕, 张明. 长江、黄河流域生态系统服务变化及权衡协同关系研究. *地理研究*, 2021, 40(3): 821-838.
- [4] Zhao M Y, Peng J, Liu Y X, Li T Y, Wang Y L. Mapping watershed-level ecosystem service bundles in the Pearl River delta, China. *Ecological Economics*, 2018, 152: 106-117.
- [5] Gou M M, Li L, Ouyang S, Wang N, La L M, Liu C F, Xiao W F. Identifying and analyzing ecosystem service bundles and their socioecological drivers in the Three Gorges Reservoir Area. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 307: 127208.
- [6] 刘海, 武靖, 陈晓玲. 丹江口水源区生态系统服务时空变化及权衡协同关系. *生态学报*, 2018, 38(13): 4609-4624.
- [7] Cord A F, Bartkowski B, Beckmann M, Dittrich A, Hermans-Neumann K, Kaim A, Lienhoop N, Locher-Krause K, Priess J, Schröter-Schlaack C, Schwarz N, Seppelt R, Strauch M, Václavík T, Volk M. Towards systematic analyses of ecosystem service trade-offs and synergies: main concepts, methods and the road ahead. *Ecosystem Services*, 2017, 28: 264-272.
- [8] Raudsepp-Hearne C, Peterson G D, Bennett E M. Ecosystem service bundles for analyzing tradeoffs in diverse landscapes. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2010, 107(11): 5242-5247.
- [9] Zhou S Y, Li W, Lu Z Y F, Cheng R H. An ecosystem-based analysis of urban sustainability by integrating ecosystem service bundles and socio-economic-environmental conditions in China. *Ecological Indicators*, 2020, 117: 106691.
- [10] 戴尔阜, 王晓莉, 朱建佳, 赵东升. 生态系统服务权衡: 方法、模型与研究框架. *地理研究*, 2016, 35(6): 1005-1016.
- [11] Bennett E M, Peterson G D, Gordon L J. Understanding relationships among multiple ecosystem services. *Ecology Letters*, 2009, 12(12): 1394-1404.
- [12] 祁宁, 赵君, 杨延征, 苟睿坤, 陈佳琦, 赵鹏祥, 李卫忠. 基于服务簇的东北地区生态系统服务权衡与协同. *生态学报*, 2020, 40(9): 2827-2837.
- [13] 冯兆, 彭建, 吴健生. 基于生态系统服务簇的深圳市生态系统服务时空演变轨迹研究. *生态学报*, 2020, 40(8): 2545-2554.
- [14] Karimi J D, Corstanje R, Harris J A. Bundling ecosystem services at a high resolution in the UK: trade-offs and synergies in urban landscapes. *Landscape Ecology*, 2021, 36(6): 1817-1835.
- [15] 李慧蕾, 彭建, 胡熠娜, 武文欢. 基于生态系统服务簇的内蒙古自治区生态功能分区. *应用生态学报*, 2017, 28(8): 2657-2666.
- [16] 申嘉澍, 梁泽, 刘来保, 李德龙, 张亚彤, 李双成. 雄安新区生态系统服务簇权衡与协同. *地理研究*, 2020, 39(1): 79-91.
- [17] Chen T Q, Feng Z, Zhao H F, Wu K N. Identification of ecosystem service bundles and driving factors in Beijing and its surrounding areas. *Science of the Total Environment*, 2020, 711: 134687.
- [18] Hou Y, Lü Y H, Chen W P, Fu B J. Temporal variation and spatial scale dependency of ecosystem service interactions: a case study on the central Loess Plateau of China. *Landscape Ecology*, 2017, 32(6): 1201-1217.
- [19] Schirpke U, Candiago S, Vigl L E, Jäger H, Labadini A, Marsoner T, Meisch C, Tasser E, Tappeiner U. Integrating supply, flow and demand to enhance the understanding of interactions among multiple ecosystem services. *Science of the Total Environment*, 2019, 651: 928-941.
- [20] Dittrich A, Seppelt R, Václavík T, Cord A F. Integrating ecosystem service bundles and socio-environmental conditions - A national scale analysis

- from Germany. *Ecosystem Services*, 2017, 28: 273-282.
- [21] Hamann M, Biggs R, Reyers B. Mapping social-ecological systems: identifying ‘green-loop’ and ‘red-loop’ dynamics based on characteristic bundles of ecosystem service use. *Global Environmental Change*, 2015, 34: 218-226.
- [22] O’Higgins T, Nogueira A A, Lillebø A I. A simple spatial typology for assessment of complex coastal ecosystem services across multiple scales. *Science of the Total Environment*, 2019, 649: 1452-1466.
- [23] Bryan B A, Nolan M, McKellar L, Connor J D, Newth D, Harwood T, King D, Navarro J, Cai Y Y, Gao L, Grundy M, Graham P, Ernst A, Dunstall S, Stock F, Brinsmead T, Harman I, Grigg N J, Battaglia M, Keating B, Wonhas A, Hatfield-Dodds S. Land-use and sustainability under intersecting global change and domestic policy scenarios: Trajectories for Australia to 2050. *Global Environmental Change*, 2016, 38: 130-152.
- [24] 孙艺杰, 任志远, 郝梦雅, 段艺芳. 黄土高原生态系统服务权衡与协同时空变化及影响因素——以延安市为例. *生态学报*, 2019, 39(10): 3443-3454.
- [25] 马慧强, 杨俊, 李哲. 太原市城市复合生态系统调节服务时空格局演化及驱动机制研究. *地理科学*, 2021, 41(3): 463-472.
- [26] Lamarque P, Lavorel S, Mouchet M, Quetier F. Plant trait-based models identify direct and indirect effects of climate change on bundles of grassland ecosystem services. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2014, 111(38): 13751-13756.
- [27] Feng Q, Zhao W W, Fu B J, Ding J Y, Wang S. Ecosystem service trade-offs and their influencing factors: a case study in the Loess Plateau of China. *Science of the Total Environment*, 2017, 607-608: 1250-1263.
- [28] Bryan B A. Incentives, land use, and ecosystem services: synthesizing complex linkages. *Environmental Science & Policy*, 2013, 27: 124-134.
- [29] Liu J Y, Li J, Qin K Y, Zhou Z X, Yang X N, Li T. Changes in land-uses and ecosystem services under multi-scenarios simulation. *Science of the Total Environment*, 2017, 586: 522-526.
- [30] 吴健生, 岳新欣, 秦维. 基于生态系统服务价值重构的生态安全格局构建——以重庆两江新区为例. *地理研究*, 2017, 36(3): 429-440.
- [31] 谢高地, 张彩霞, 张昌顺, 肖玉, 鲁春霞. 中国生态系统服务的价值. *资源科学*, 2015, 37(9): 1740-1746.
- [32] Kohonen T. Self-organized formation of topologically correct feature maps. *Biological Cybernetics*, 1982, 43(1): 59-69.
- [33] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望. *地理学报*, 2017, 72(1): 116-134.
- [34] 辽宁省水利厅. 2005 年辽宁省水资源公报. (2005-02-02). http://slt.ln.gov.cn/jbgb/szygb/202102/t20210202_4079703.html.
- [35] 辽宁省水利厅. 2015 年辽宁省水资源公报. (2016-03-23). http://slt.ln.gov.cn/jbgb/szygb/201605/t20160503_2141426.html.
- [36] 陈姗姗, 刘康, 包玉斌, 陈海. 商洛市水源涵养服务功能空间格局与影响因素. *地理科学*, 2016, 36(10): 1546-1554.
- [37] 大连市水务局. 大连市水土保持规划(2016—2030 年). (2017-12-13). https://swj.dl.gov.cn/art/2017/12/13/art_4276_645962.html.
- [38] 杨志鹏, 许嘉巍, 冯兴华, 郭蒙, 靳英华, 高雪娇. 基于 InVEST 模型的东北地区土地利用变化对生境的影响研究. *生态科学*, 2018, 37(6): 139-147.
- [39] Aneseyee A B, Noszczyk T, Soromessa T, Elias E. The InVEST habitat quality model associated with land use/cover changes: a qualitative case study of the Winike watershed in the Omo-Gibe basin, southwest Ethiopia. *Remote Sensing*, 2020, 12(7): 1103.